平成 18 年度 修士論文

アキシャル型風力発電機の最適設計と動磁場解析

Design and Dynamic Magnetic Field Analysis for Axial-gap type Wind Power Generator

高知工科大学 大学院
工学研究科基盤工学専攻

知能機械システム工学コース
環境機械・材料強度研究室

1095204

尾崎 聖宏

目次

第 1 章　　序論

第 2 章　　発電機

第 3 章　　動磁場解析

第 4 章　　磁極因子が及ぼす発電性能への影響

第 5 章　　コアの厚さが及ぼす発電性能への影響

第 6 章　　結論

参考文献

謝辞

第 1 章：序論

1.1　エネルギー問題

近年の増加し続けるエネルギー消費によって、二酸化炭素排出の増加やエネルギー枯渇の問題が起こっている。世界のエネルギー需要は経済成長との相関関係が極めて高い。これまでの傾向を見ると、エネルギー需要は年率 2.0%で増大する一方で、経済成長率は 3.3%程度であり、その弾性値は 0.61 程度となっている。

今後特にアジア圏の人口が増大し、経済成長が続くことに伴い、エネルギー需要も増大することが予想される。最近の世界エネルギー需要見通しによると、2030 年のエネルギー需要率は、200 年時点と比較して約 53%も増大するものと予想されている。特に発展途上国においては電気にアクセスできる人数が増え、エネルギーの増加も起こる。

この問題の対策には世界規模で取り込まれており、その中で新しいエネルギー源の開発がさかんに行われてきた。

日本では「新エネルギー」は、1997 年に施行された「新エネルギー利用等の促進に関する特別措置法」において「新エネルギー利用等」として規定されており、「技術的に実用化段階に達しつつあるが、経済性の面での制約から普及が十分でないもので、石油代替エネルギーの導入を図るために特に必要なもの」と定義している。そのため、実用化段階に達した水力発電や地熱発電、研究 開発段階にある波力発電や海洋温度差発電は、自然エネルギーであっても新エネルギーには指定されていない。

新エネルギーは CO_2 の排出が少ないことなど環境へ与える負荷が小さく、太陽光発電や風力発電などの自然エネルギーは無尽蔵で枯渇の心配も無く、資源制限が少ない国産エネルギーとなれる。また、新エネルギーの多くは地域分散型であり、需要地と近接しているため輸送によるエネルギー損失も低く抑えられる。

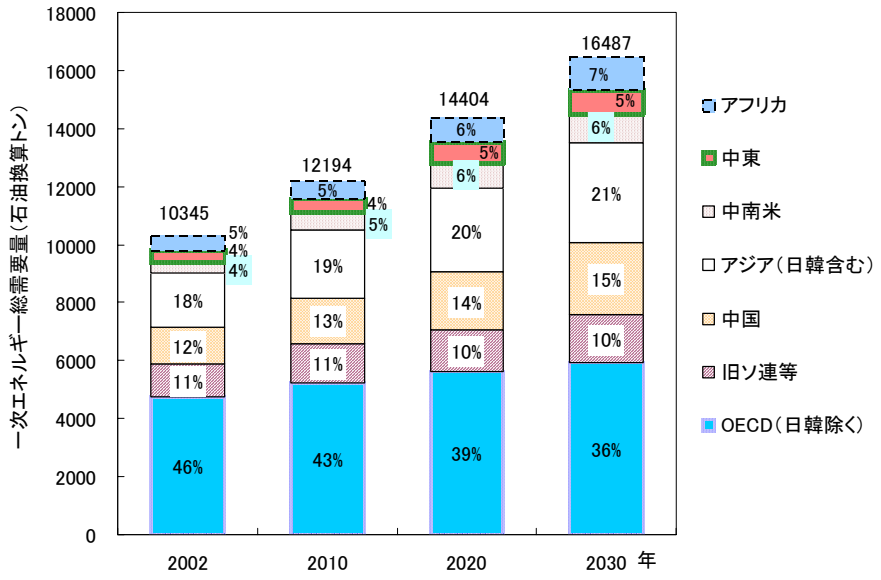

図 1-1　世界のエネルギー需要の見通し(IEA)

1.2　日本の風力発電

日本でも太陽発電や風力発電はすでに実稼動が行われており、日本の太陽光発電は世界の約30%を占め総発電容量は約 141 万 kW、風力発電は約 105 万 kW の導入量になった(図 1-2)。ここで風力発電に関しては、長期エネルギー需要見直しにより、風力発電導入量は 2000 年時点では2010 年の達成目標は 30 万 kW としていたが、現在では 300 万 kW までの大幅な上方修正がなされている。さらに、国内の風力発電市場に関する調査結果から、これからの小型風力発電システムの市場規模は、販売金額ベースで前年比 41%増の 46 億 600 万円に達する見通しがあるとされ、ますます風力発電の利用が広まっていくと考えられる。

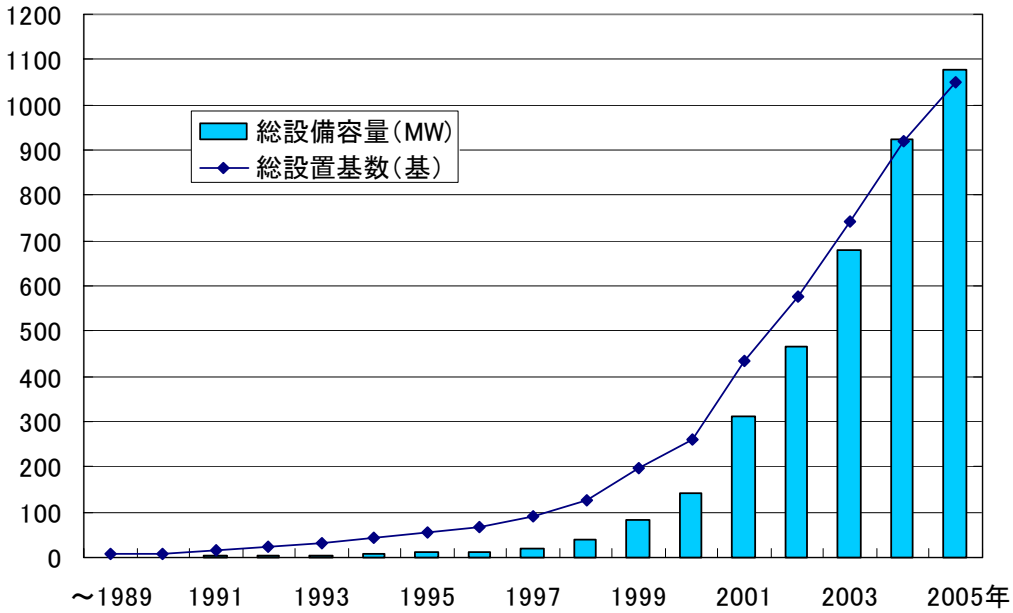

図 1-2　日本における風力発電導入量の推移 (2006 年 3 月末現在)

（NEDO 技術開発機構より）

しかし、日本の風力発電には以下のような問題がある。

(1) 風況の良い利用可能な地域は少なく、山岳地が多いため風の乱れが大きく、設備利用率などに起因する発電コストが高い。

(2) 日本は国土が狭いため、大型の風力発電機を多く設置することができない。

(3) 騒音・景観問題。

(4) 落雷・強風により設置後の故障、破損などの問題が起きており、製品の安全性向上を図るとともに、設置業者・運用者の啓発に取り組む必要がある。

そこで、日本の風を考慮した風車を考える必要がある。ドイツなど欧州での風力発電機はプロペラ型が主流であるが、プロペラ型は風速 4m/s 以上で発電を開始し、高風速下で発電能力を発揮する。しかし、日本の平均風速は 3～5m/s 以下と低く、大気の乱れが大きいために低風速の風を利用することは難しい。

1.3　研究概要

以上の状況から、本研究室では小型風力発電機の開発と研究を行ってきた。そして、高知県企業と共に太陽光・風力ハイブリッド発電機を開発した。風車には風向きに関わらず風を受け、低風速からの回転始動が可能なサボニウス型を採用した。サボニウス型風力発電機は風速 3m/s から発電を開始するので、効率的に日本の風の力を利用できる。その低風速からの始動を可能にするために発電機にはコアレス設計を用いている。

図 1-3　太陽光・風力ハイブリッド発電機

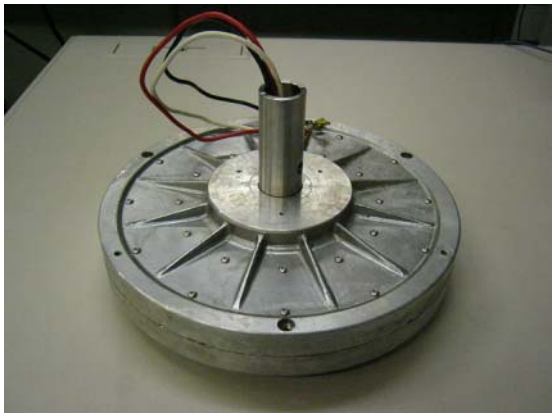

図 1-4　アキシャル型コアレス発電機

1.4　研究目的

本研究の目的は、低風速からでも回転する小型の風力発電機において、最適な内部構造の設計指針を導くことである。そのためにこれまでいくつかの解析と実験を行った。動磁場解析と実際に開発した発電機の回転実験である。そして、これらの解析と実験結果を比較検討することで新たな開発の指針を導く。

第 2 章：発電機

2.1 発電原理

磁界中で磁石とコイルの位置が近づいたり離れたりすると、磁界が変化して誘導電流が流れる。この原理を応用したのが発電機である。

磁束密度 B[T]の一様な磁場の中で導線(磁界内の長さ l [m])を、磁場と導線に垂直な向きに速度 v[m/s]で移動させると、導体に誘電起電力 e[V]が発生する。

$$e = vBl \qquad (1)$$

(1)式をコイルの関係に当てはめると、n 巻きのコイルを通る磁束が時間 dt[s]の間に $d\phi$[Wb]だけ変化するときに生じる誘導起電力 e[V]は次式になる。

$$e = -n\frac{d\phi}{dt} \qquad (2)$$

(負の符号は、磁束の変化を打ち消す向きに誘導起電力が生じていることを示している)

以上の式から磁石を動かす速度が大きいほど、また磁石の磁場が強いほど、誘導起電力が大きくなることがわかる。

2.2 発電機の構造

発電機の構造は基本的に電動機と同じであり、発電機の構造を大別するとアキシャル型とラジアル型がある。本研究で取り扱う発電機はアキシャル型発電機である。アキシャル型発電機とは、回転軸に対して固定子と回転子が垂直にあり、磁力線の方向が軸と平行になる構造である。ラジアル型は回転軸に対して回転子が平行にあり、磁力線が軸に垂直となる構造である（図 2-1）。アキシャル型は構造が比較的簡単で、ラジアル型と比べて小型化がしやすい。

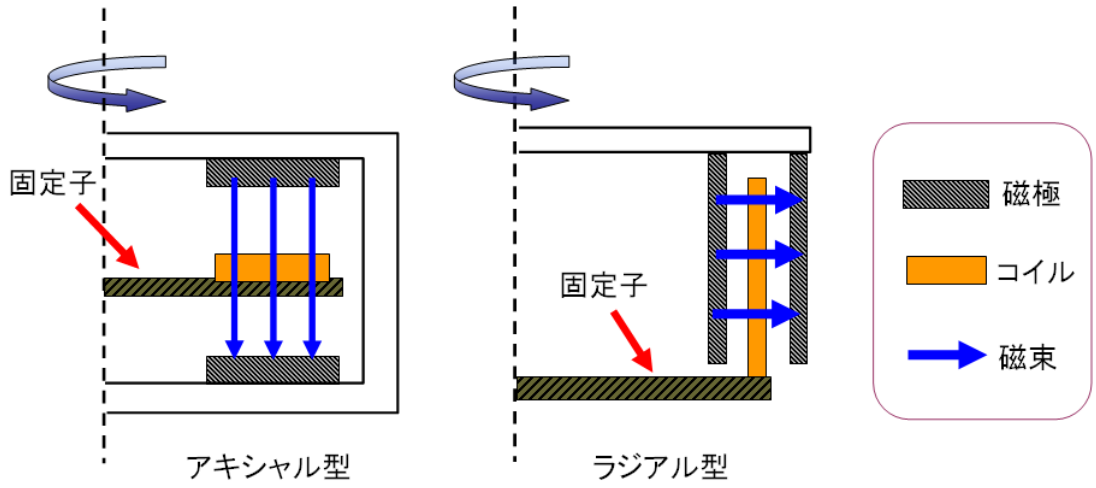

図 2-1 二種類の発電機の構造

2.3　コギングトルク

「コギングトルク」とは、一般的に「超低速で回転子を回転させた場合に生じる保持トルク」と言われる。すなわち、回転機を無励磁状態（電源を入れない状態）で外力により回転させた場合に生じるトルクのことで、「カクカク」と伝わってきた微振動のことである。このコギングトルクが大きいと、高速で回転すると振動・騒音を生じてしまいモータ効率もかなり悪くなる。

コギングトルクの原因としては、磁石と磁性体の引きつけや反発によって生じる他に渦電流も原因となる。

渦電流とは、強い磁界内で金属片を移動させたり、金属板の周りの磁界を急激に変化させた際に、電磁誘導効果により金属内で生じる渦状の電流のことである。渦電流は周囲の磁界の変化を打ち消す磁界が生じるように流れる。この電流により磁界が発生し、物体の運動を抑える力が生じて、回転を妨げることになる（図 2-2）。

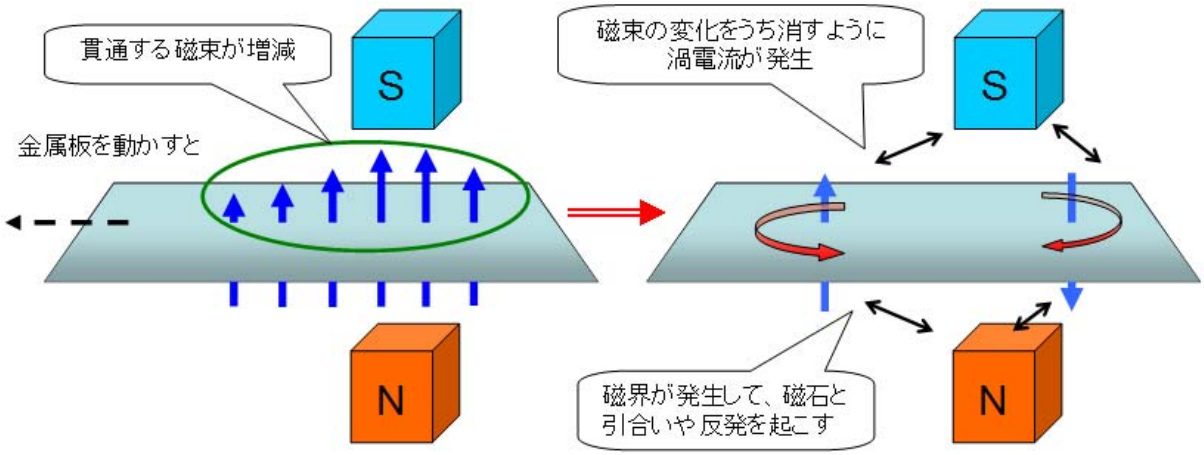

図 2-2　渦電流の仕組み

渦電流はコギングトルク以外にも熱の形でエネルギーを消耗し、無用な障害となる問題がある。このような損失を低減させるには金属部分を層状にすると効果的である。ケイ素鋼のような絶縁した薄い金属層を積み重ねると、層状の構造体は本来ならば渦電流を流れる回路を寸断し、電流を個々の層内に閉じ込めてしまう。

2.4　コアレス設計

これまでに述べたことから、一般的な発電機はコギングトルクのために日本の低風速域での風力発電機の利用は難しい。

そこで取り上げたのがコアレス発電機である。一般的な発電機の内部にあるコイル中心に組み込まれた鉄心を取り除き、樹脂で固めることでコイルを保持し、ロータにしたものである。

コアレス発電機の特徴としては、鉄心が無いために鉄心と磁石との吸引・反発によるコギングトルクがなく回転が滑らかになる。また、慣性モーメントが小さく、応答性が良い。さらに、磁束が鉄心を通ることで生じていた渦電流損が発生しないため効率が良い。しかしながら、このような特徴がある反面、コアレスであるためにコイル内に磁束を導くものがなく、隣の磁石に流れる磁束が多くなり、コイルを通過する磁束密度が減り発電量が小さくなってしまう（図 2-3)。

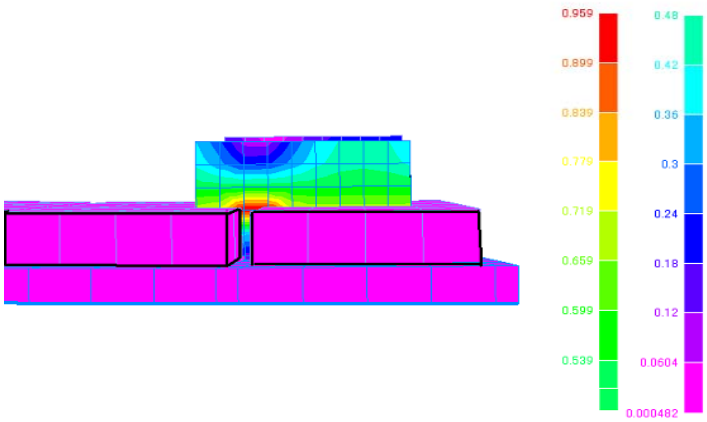

図 2-3　発電機内部の空間磁場解析

第 3 章：動磁場解析

3.1　磁場解析の目的

発電機の性能を調査するためには、発電機を製作して実験を行うことが望ましい。しかし、各仕様の発電機を製作して実験を行うことは多額の費用と時間が必要である。また、磁束の流れ、磁束密度などは視覚的に表すことが難しい。そこで、本研究室では動磁場解析を利用して、シミュレーションを行いその結果を参考にしながら発電機の開発を行うことにした。

3.2　解析ソフトと動作環境

解析対象のモデリングに利用したのはプリ・ポストプロセッサの FEMAP である。しかし EMAP では図面からモデルを作成するのは手間がかかる。そこで、まず 3DCAD ソフトでモデルを作成し、それを CAD 中間形式の iges ファイルに変換した後、FEMAP にインポートして解析モデルを作成している。

動磁場解析に使用したのは利用したソフトは株式会社エルフの ELF/MAGIC である。本ソフトは「積分要素法(IEM)」を用いた 3 次元非線形磁場解析プログラムである。有限要素法(FEM)などに必要な空間メッシュ・境界条件・ゲージ条件など必要としないため、データ作成が簡単であり、短時間で計算を行うことができる。本研究で使用する解析モデルでは、解析時間は約 2～5 時間程度である（モデルの分割数等によって変わる）。

動作環境は以下の通りである。

・CPU　: Intel Pentium 4　2.8GHz
・メモリ: 2GB
・OS　　: Windows 2000

3.3　計算式

ELF/MAGIC で使われている主な積分要素法の計算式は以下の通りである。

・誘導電流

誘導電流の計算は、回路の電圧方程式を磁場に関する方程式と関連させて求めます。具体的には次の式を使って計算している。

$$I_{ind} = -\frac{N}{R}\frac{d\sum\phi}{dt} \qquad (3)$$

I_{ind}　：誘導電流
N　：コイルの巻数
R　：抵抗
ϕ　：磁束量
t　：時間

・トルクと力

ELF/MAGIC では真空中のマクスウェル応力の式を力の計算に使用しています。

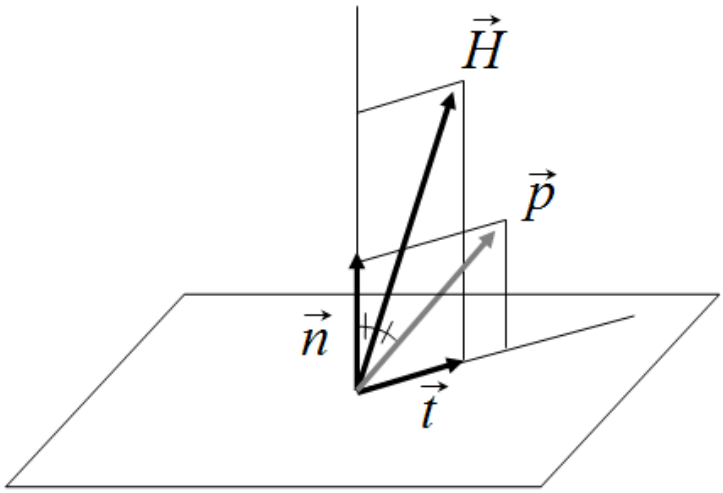

図 3-1　マクスウェル応力との関係

・マクスウェル応力式

$$\vec{p} = \left(\vec{B}\cdot\vec{n}\right)\vec{H} - \frac{1}{2}\left(\vec{H}\cdot\vec{B}\right)\vec{n} \qquad (4)$$

・真空中のマクスウェル応力式

$$\vec{p} = \mu_0 H_n \vec{H} - \frac{\mu_0 H^2}{2}\vec{n} \qquad (5)$$

ただし H_n は磁場 H の法線成分とする。

図 3-1 より $\vec{p}$ を法線方向と、面に沿った方向に分解すると、

$$\vec{p} = \left(\mu_0 H_n H_t\right)\vec{t} - \mu_0\left(H_n^2 - \frac{H^2}{2}\right)\vec{n} \qquad (6)$$

（$\vec{n}$ は法線方向の単位ベクトル、$\vec{t}$ は面に沿った方向を向く単位ベクトル）

力学の応力との対応では、$\vec{n}$ 方向の成分は引張り・圧縮応力に、$\vec{t}$ 方向の成分はせん断応力に相当します。ただし、マクスウェルの応力面に電磁力が直接作用するわけではない。マクスウェル応力の物理的な意味は、面を通過する電磁運動量の密度であり、閉曲面を出入りする全ての電磁運動量を合計して初めて力としての意味を持つ。つまり物体が磁場の中で受ける力を計算するには、物体を囲む閉曲面についてマクスウェル応力を面積分する必要がある。トルクはベクトル式 $T = r \times F$ を使って計算する。

$$\vec{F} = \sum S\vec{p} \qquad (7)$$

$$\vec{T} = \sum \vec{r} \times S\vec{p} \qquad (8)$$

$\vec{F}, \vec{T}$ はベクトルなのでそれぞれ 3 つの成分を持ち、ELF/MAGIC では *Fx, Fy, Fz, Tx, Ty, Tz* の値を出力する。

物体が回転軸の周りに固定されているとき、運動に影響を与えるのは $\vec{T}$ の回転軸成分だけである。今回は回転軸が Z 軸となるので、*Tz* の値をとる。

3.4　解析モデル

下図に本研究で解析をおこなったφ600mm 発電機の解析モデルを示す。主にバックヨーク、磁極、コイルの要素をモデル化する。モデルは解析時間短縮のために対称性を利用し、形状の簡略化ができる。半径方向に 15 分の 1、軸方向に 2 分の 1 で計 30 分の 1 の分割モデルで解析を行った。磁石とバックヨークを回転子、コイルを固定子としている。

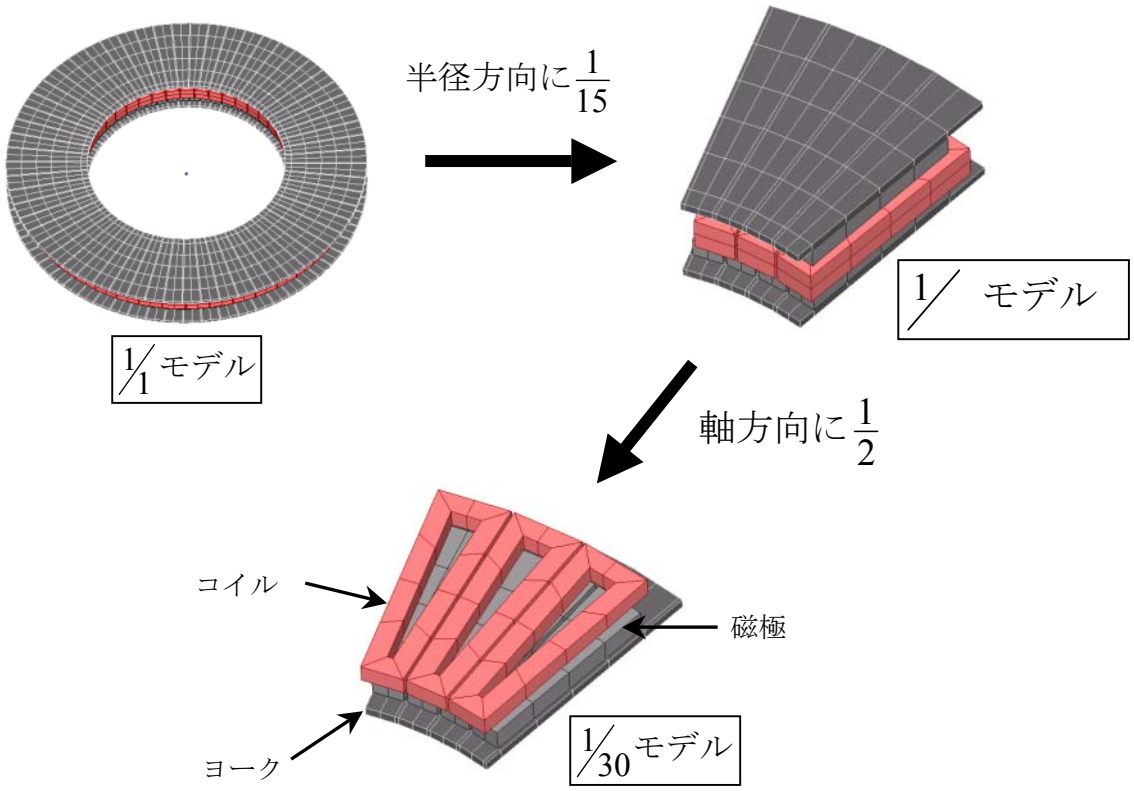

図 3-2　発電機の各分割モデル

解析では磁極に Nd-Fe-B 希土類永久磁石、バックヨークに鉄 SS400 を使用している。それぞれの磁化特性を図 3-3、図 3-4 に示す。

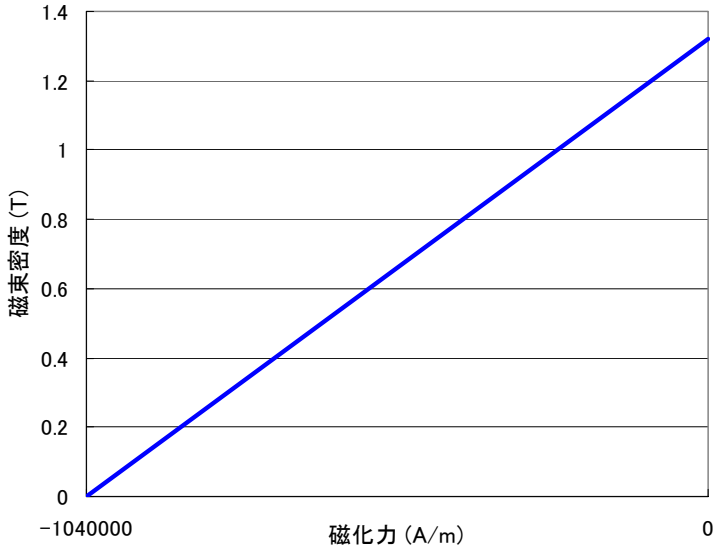

図 3-3　Nd-Fe-B 希土類永久磁石の磁化曲線
（株式会社 NEOMAX カタログ「希土類磁石」より）

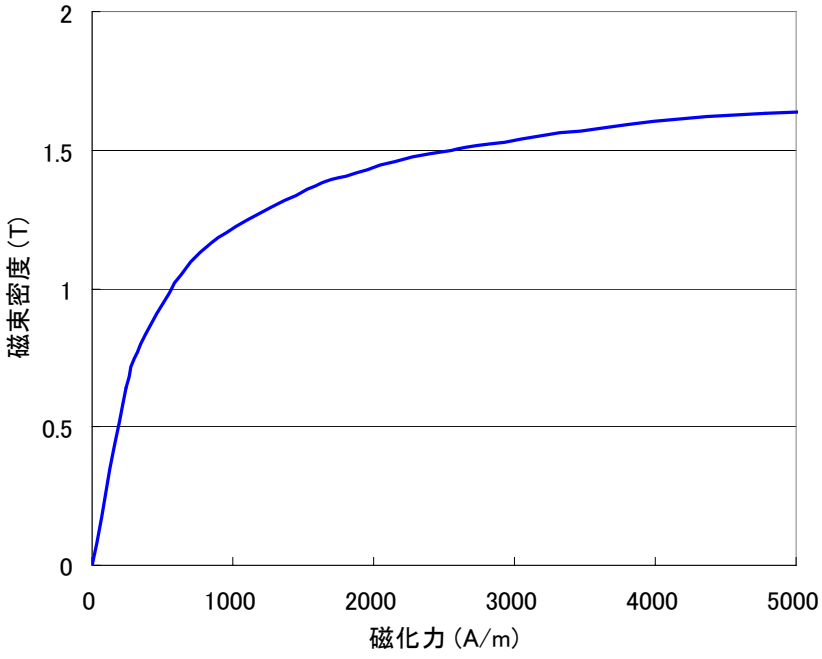

図 3-4　SS400 の磁化曲線
（社会法人日本溶接協会・資料より）

3.5　実験結果と数値解析値との比較

動磁場解析は、開発の効率化向上のために欠かせないツールである。しかし、実験結果とどれほど近似しているかを調べる必要がある。実験結果と近似しているということが証明できたならば、実験を行わなくてもシミュレーション上で定性的な値を求めることができる。その結果を利用して、開発期間の短縮・コストの削減が可能になる。

そこで、無負荷状態時における実験結果と数値解析結果との値の比較を行った。

3.5.1　実験

モータを使って発電機の性能評価を行った。実験方法については以下に示す。図 3-5 は実験装置であり、図 3-6 は実験の回路図である。実験を行った発電機の仕様は表 1 に示す。

・回転数は直流モータの速度調整で一定に保つ

・直流モータから発電機の軸トルクを測定し、軸トルクと回転数から発電機への入力電力を計算で求める

・発電機の出力は三相ダイオードブリッジを通じて負荷に供給される。出力電圧、電流、電力は三相ダイオードの出力側をディジタルパワーメーターで測定する。負荷は可変抵抗により加減する。なお、回路図の R'は、無負荷時のダイオード出力電圧測定用の高抵抗で負荷としては無視できる。

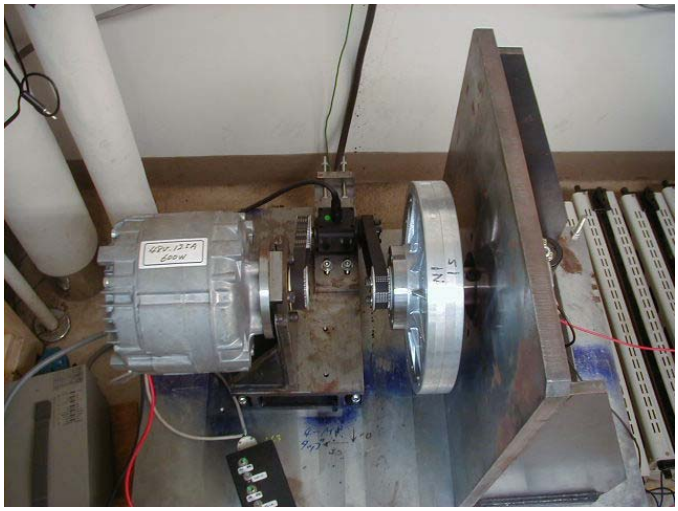

図 3-5　実験装置

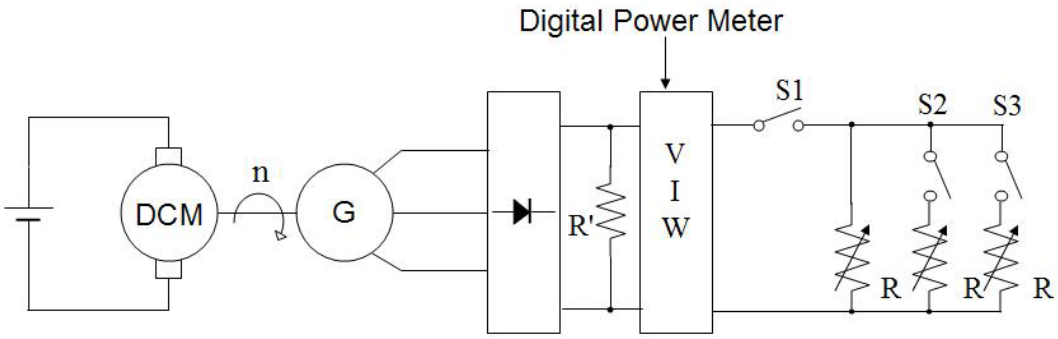

図 3-6　実験回路図

表 1　実験の発電機の仕様

発電機直径	コイル線径	巻数	コイル厚み	磁石間距離
200 mm	1.0 mm	77 t	9.6 mm	12.2 mm

3.5.2　比較結果

解析により各回転数における三相交流電圧が求まる。そのデータを実験値と比較するためには、実効値に変換する必要がある。実効値への変換は次式より行った。

$$実効値(V) = \frac{最大電圧値(V)}{\sqrt{2}} \qquad (9)$$

表 2 と図 3-7 は実験値と解析値(実効値)の比較である。グラフからも分かるように、実験値と近似した結果を得る事ができた。これにより、本ソフトを利用して発電機の性能向上に関する検討を行えることが確認できた。

表 2　各回転数における実験値と解析値

回転数 (rpm)	100	200	300	400	500
実験値 (V)	4.85	9.8	14.67	19.53	24.52
解析値 (V)	4.852	9.705	14.557	19.410	24.262

回転数 (rpm)	600	700	800	900	1000
実験値 (V)	29.3	34.25	39.01	44.15	48.85
解析値 (V)	29.115	33.967	38.820	43.672	48.524

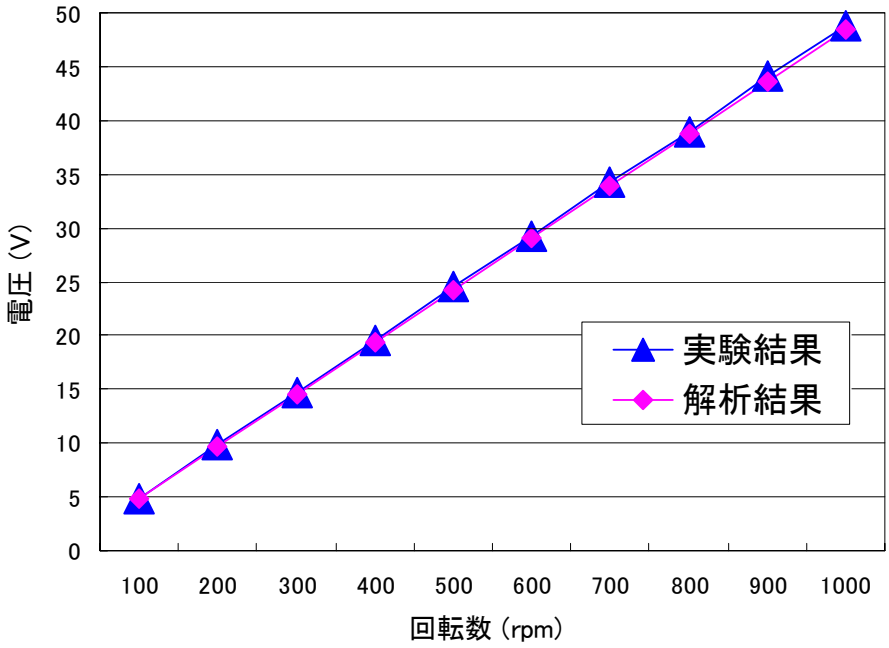

図 3-7　実験結果と解析結果の比較

第 4 章：磁極因子が及ぼす発電性能への影響

これまでに本研究室では、コアレス発電機に対して各種の設計因子が発電性能に及ぼす影響について解析・考察を行ってきた。以下にそれらを記す。そして今回は磁極因子に関してまだ検討の余地があると考え、磁極の配置・形状、磁極間の状態などに注目して解析を行った。

(1) コイルと磁極の配置数の比

電圧を整流した際、平均電圧が高く、効率よく電力が取り出せるコイル：磁極の配置数の比が導かれている。

(2) 同径の発電機におけるコイルと磁極の配置数変化

同径の発電機において、コイル：磁極の比を変えずにコイルと磁極の配置数を変えたときの影響を調べた。

コイル・磁極の個数を増やしても、コイル単体の面積・巻数が減り、コイル個々の発電量は減少して全体的な発電量は必ずしも増加しない。

(3) コイル内のコア形状による影響

コアレスコイルにコアを挿入することで、弱点である発電量の少なさを改善させ、且つコギングトルクを抑えることを図った。そのために数種のコア形状が考察され、コイル内部全面に薄板状コアを配置することで、コギングトルクを抑え発電量を 13.5%上げた。

(4) コアの材質

薄板状コアの材質を、極端に透磁率を変えた 2 つの素材（素材 A；0.213[H/m]、素材 B；0.4×10^{-4} [H/m]）にして解析した。その結果、電圧とトルクは共にほぼ同じ値となった。これは磁極とコアの間にエアギャップが存在し、空気中の透磁率の低さによってコアに到達する磁束が小さいので、磁化特性による影響が出ないためだと考えられる。

(5) 磁極の厚さ

磁極を厚くすることで発電量は増加するが、徐々に発電量の増加幅は少なくなる。また、発電機自身の重量を増すことになるので回転への影響が生じる。

(6) バックヨークの厚さ

バックヨークは磁気回路を形成するために用いられ、飽和による磁気漏洩を減少させる効果がある。磁力の強さによってヨークの厚みは必要になるが、ヨークの厚みを 3mm 以上にしても発電量に大きな増加は見られなかった。

(7) 磁極間距離

対向する磁極間の距離は発電能力に大きく影響する。単純にコイルの巻数を増やせば電圧値は上がるが、巻数を増やすとコイル厚さが増し磁極間距離が広がるので、コイル内の磁束密度が弱まり発電量が減少してしまうことがある。

4.1　磁極の配置

本研究でのこれまでの発電機はアキシャル構造で磁極が互いに対向した構造である。この対向している磁極の片側を 1°, 2°, 3°, 4°, 5°ずらした。磁極は 6°間隔で 60 個配置されている。

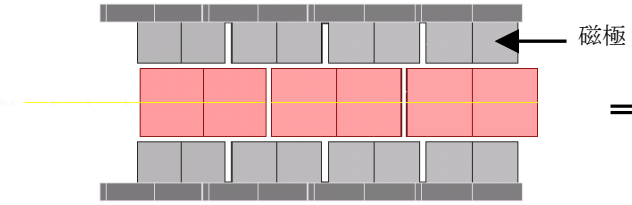

図 4-1　従来の発電機モデル

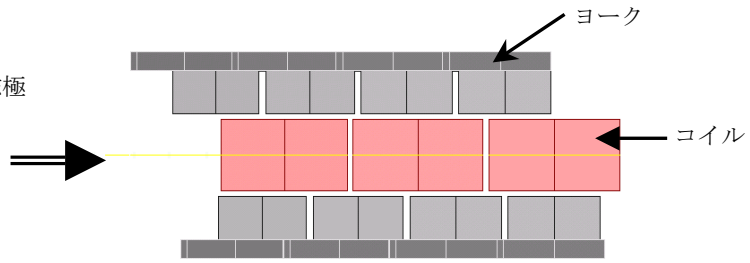

図 4-2　片方の磁極を 3°ずらした発電機モデル

前述したとおりコギングトルクは、コイル内のコアが磁化することで磁石間に生じる吸引と反発が原因である。そこで、対向する 2 つの磁極がなす角度を変更することで、磁化したコアと磁石間の反発力と引力をバランスよく配分し、コギングトルクの減少を図った。

4.1.1　解析条件

・対象モデル

- ◆ φ600mm 発電機
- ◆ 磁極厚さ　12mm
- ◆ ヨーク厚さ　5mm
- ◆ 磁極間距離　23mm
- ◆ 巻数 136 巻
- ◆ コア有りモデル

・解析条件

- ● 回転数 200rpm
- ● 軸方向 1/1 モデル
- ● 半径方向 1/15 モデル
- ● 磁極とヨークを回転子

4.1.2　解析結果

1) 電圧値

図 4-3 に解析から求められた電圧値を示す。グラフは磁極を角度 1～5°までずらしたモデルと従来のコアレスモデルの最大電圧値を比較している。対向する磁極をずらすごとに発電量は減少していき 5°ずらしたときにはコアレスコイルの発電量よりも小さくなっている。

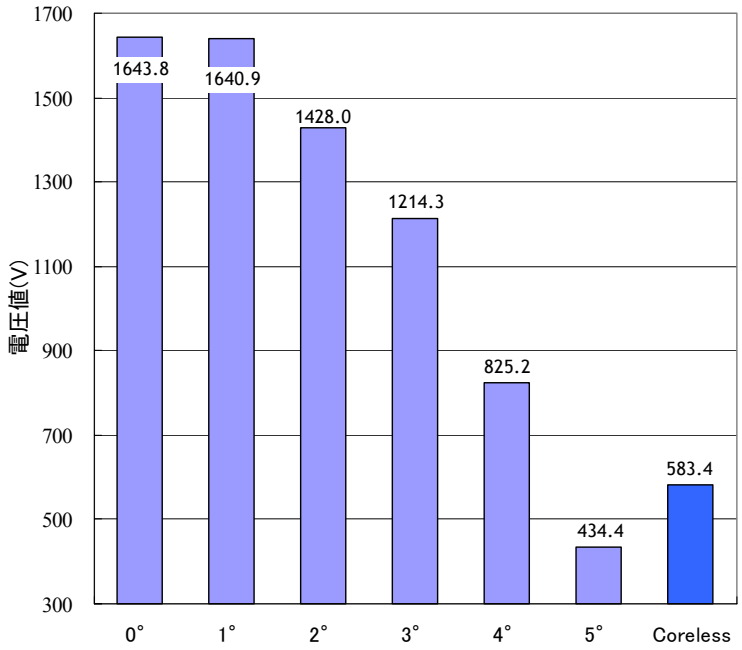

図 4-3　コアレスモデルと各角度時の最大電圧値

1-1）磁場の観察

この電圧値の結果を調べるために各モデルの空間磁場解析を行った。図 4-4 に空間磁場を観察するための評価要素の配置の様子を示す。評価要素はコイルを通過する磁場を観察するために、図のようにコイルの厚み方向の断面と半径方向の断面に配置した。

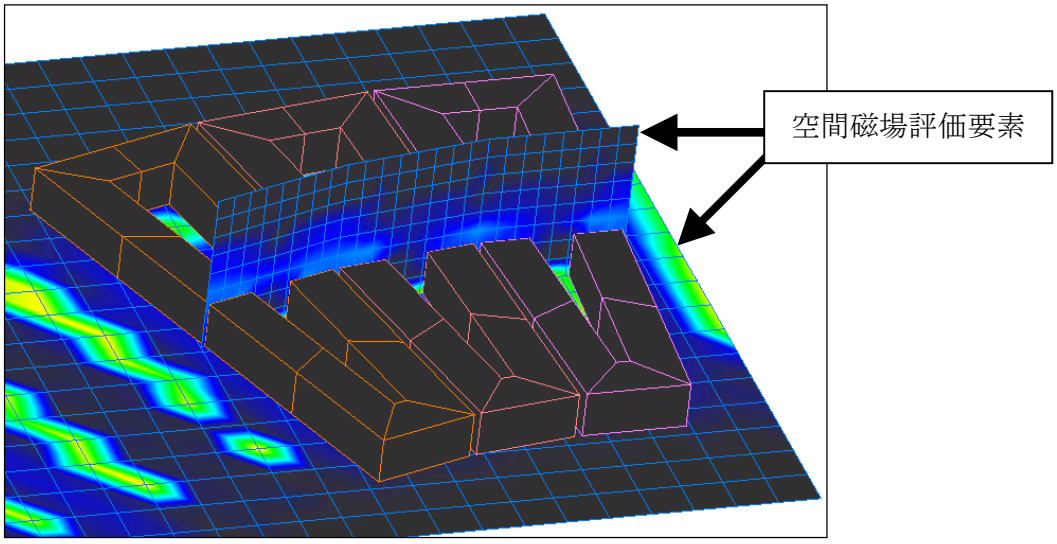

図 4-4　空間磁場解析要素の配置位置

図 4-5 に各モデルの空間磁場の様子を表す。図は磁束の向きと同じ方向から見たコイル断面の磁場の様子である。

N 極と S 極のなす角度が大きくなるとともに磁束の強さが小さくなっていることが観察できる。これは対抗する N 極と S 極のずれが大きくなると同時に N-S 間の距離も広がるからである。これにより N-S 間の磁束密度が弱まり、電圧値も減少してしまう。また、角度 5° のときはほぼ同極が向き合う形となるために磁気回路を形成することも難しくなる。

つまり、N 極と S 極が向かい合っているときが最も磁束密度が高く、電圧値が大きいということである。

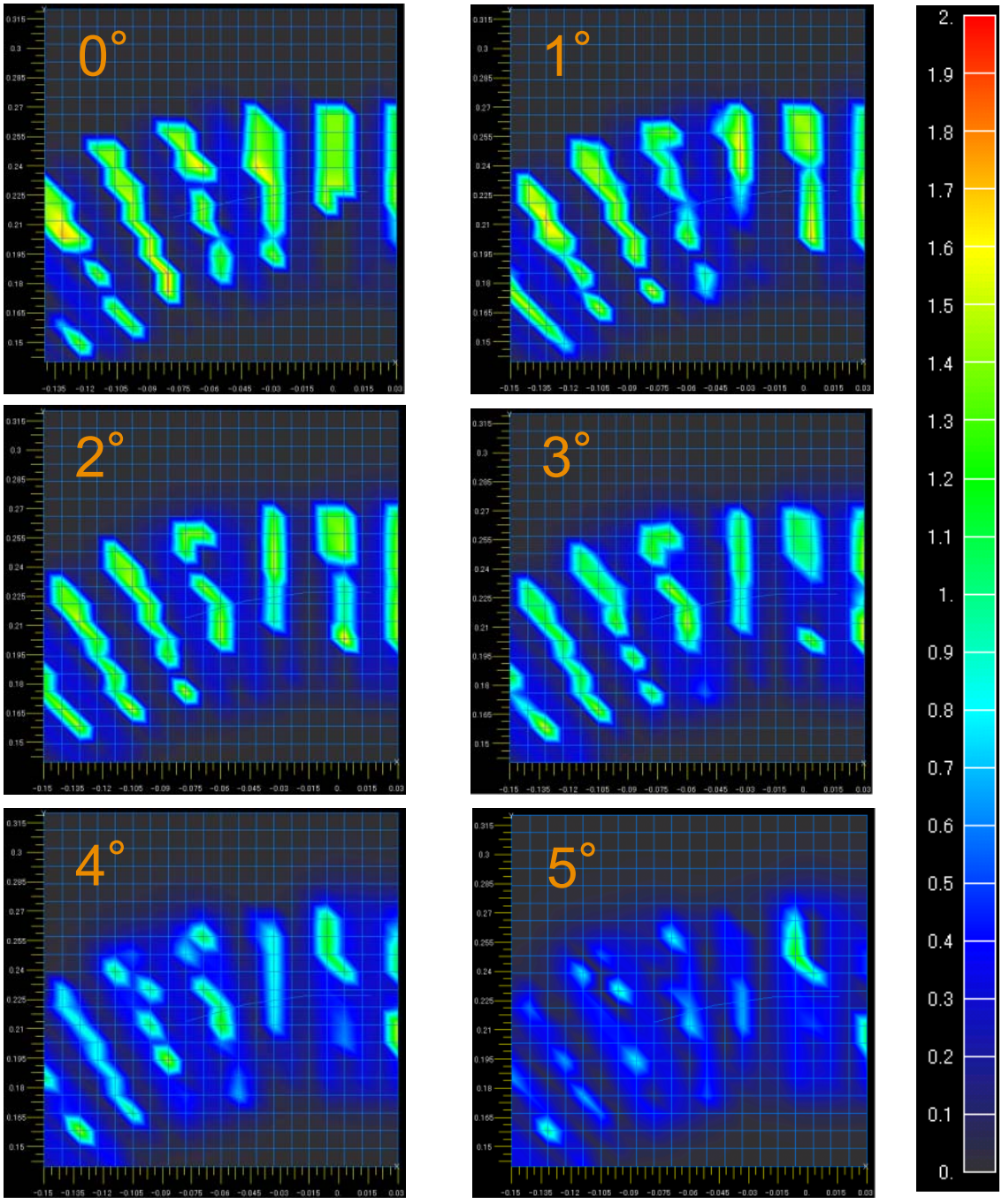

図 4-5　各モデルの空間磁場の様子（磁束方向から見た図）

2) トルク値

図 4-6 に各角度のときのトルク値を示す。3° ずらしたときがトルク最大で、1°, 5°ずらしたときも同様に高い値である。2°, 4°ずらしたときは、対向した磁極の場合とほぼ変わらないトルク値を示した。図 4-7 は各角度のトルクの最大値をそれぞれ示している。これより 2° 間隔でトルク値が小さくなることが分かる。

この検討では磁極をずらすことによるコギングトルクの低減はできなかった。しかし、対向する磁極のわずかなずれによって大きなコギングトルクが生じる可能性があることが分かった。

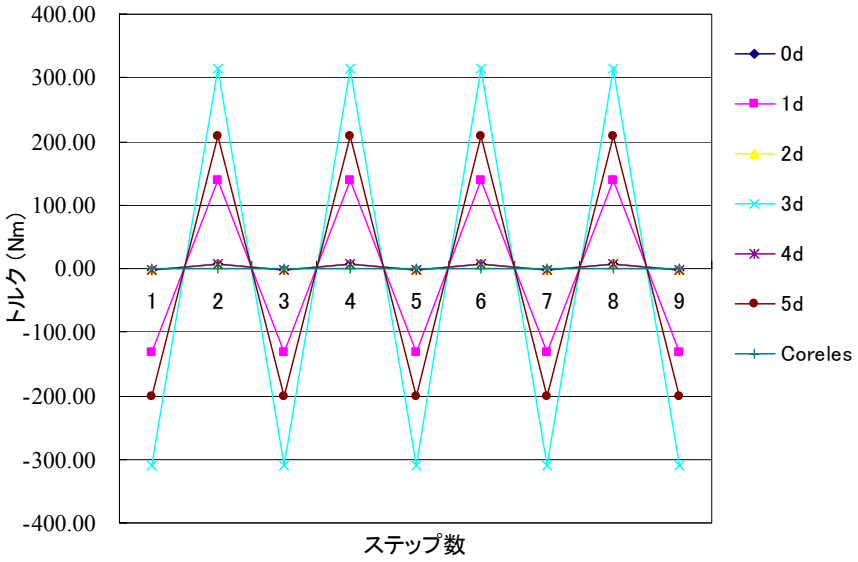

図 4-6　コアレスモデルと各角度によるトルク値

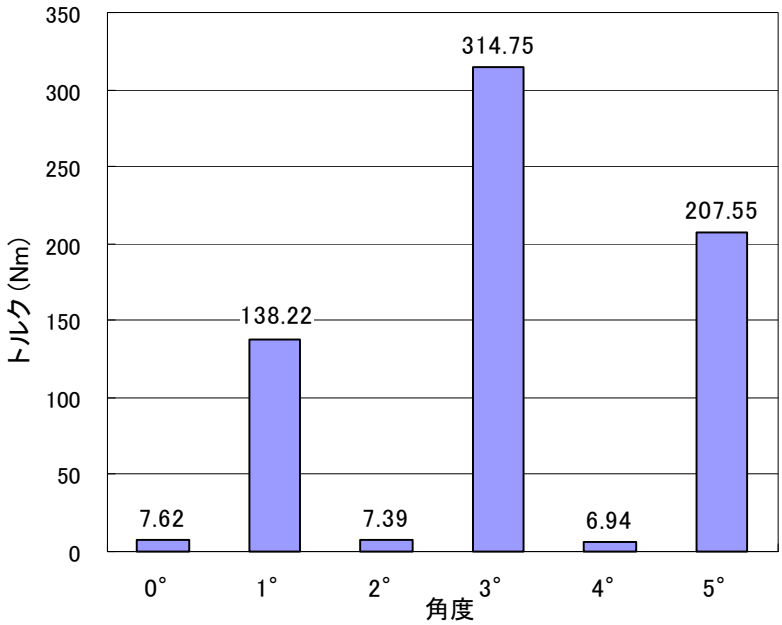

図 4-7　各角度による最大トルク値

4-2　磁極間の距離と磁極周辺の変化

対向する磁極間距離より隣合う磁極間距離が近すぎるために、磁束が隣の磁石へ流れ、コイル内に有効的に磁束が通過しないのではと考えた。そこで隣合う磁極間の距離を変化させて解析を行った。さらにそれによってできた磁極間の隙間に鉄ヨークを挿入したモデル（図 4-9.a）、磁極を鉄ヨークで囲んだモデル（図 4-9.b）の解析を行った。

また、コアレスモデルとコイル厚さ分のコアを挿入したモデルの 2 つと合わせて解析を行った。

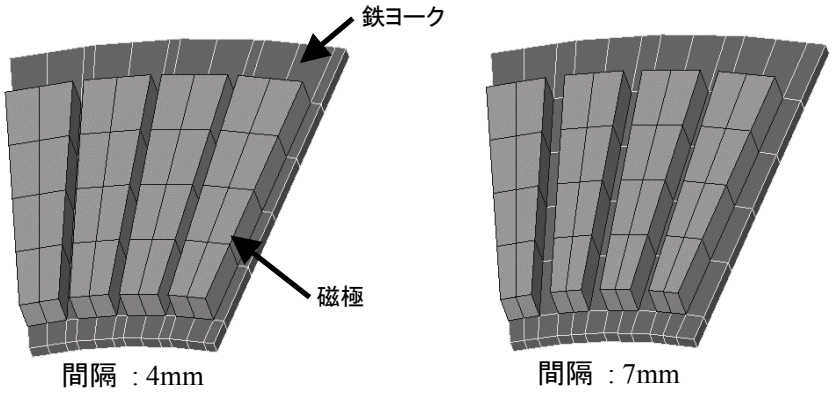

図 4-8　磁極間距離を変化させたモデル（以下 DD モデル）

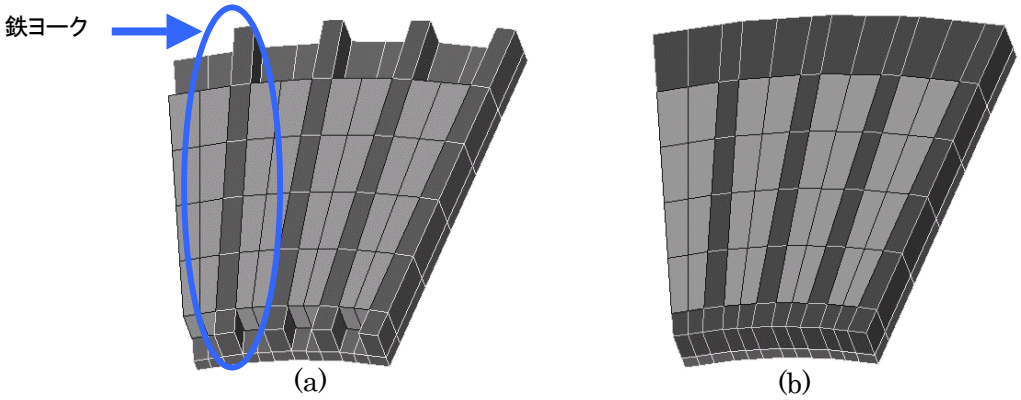

図 4-9　(a) 磁極間に鉄ヨークを挿入したモデル（以下 DB モデル）
(b) 磁極を鉄ヨークで囲んだモデル（以下 DU モデル）

4.2.1　解析モデル

・対象モデル

- ◆　φ600mm 発電機
- ◆　磁極厚さ　12mm
- ◆　ヨーク厚さ　5mm
- ◆　磁極間距離　23mm
- ◆　巻数 136 巻
- ◆　コアレスモデル、コア有りモデル
- ◆　隣合う磁極間距離を 1～7mm で変化

・解析条件

- ●　回転数 200rpm
- ●　軸方向 1/2 モデル
- ●　半径方向 1/15 モデル
- ●　磁極とヨークを回転子

4.2.2　解析結果

1) 電圧値

図 4-10、図 4-11 はコアレスモデルとコア有りモデルのそれぞれの最大電圧値の解析結果を示す。コアレスモデルでは隣合う磁極間が広くなるほど、磁極を鉄ヨークで囲むほど電圧値が減少していく。コア有りのとき、DD モデルでは磁極間の広がりと共に電圧値が減少していく傾向にあるが、DB モデルと DU モデルは 2mm のとき最大になる。

コアレスの場合、隣合う磁極間距離を広げると同時に個々の磁極自身が小さくなるので磁束は減り、結果的に発電量の減少になる。また、磁極間に鉄を挟んだことで隣の磁極へ流れる磁束が集中するためコイル内を通過する磁束が減り、電圧値も減少するものと考える。結果的に電圧値を上げるには、磁極間を空けるよりも磁極自身を大きくしたほうが有効であるといえる。

コア有りの場合、コアレスの時とは反対に磁極間が空隙である DD モデルと比べて、鉄ヨークを挿入したモデルの電圧値が 14%程度高い。これは磁極間の鉄に磁束が流れてはいるが、コアが磁束をコイル内に導いているためにコイル内の磁束密度が減ることはない。むしろ磁極間の鉄が磁極化しており、これまで空隙であった部分でも磁束の流れがあるので、より多くの磁束をコアがコイル内に導いて電圧値が増加していると考えられる。

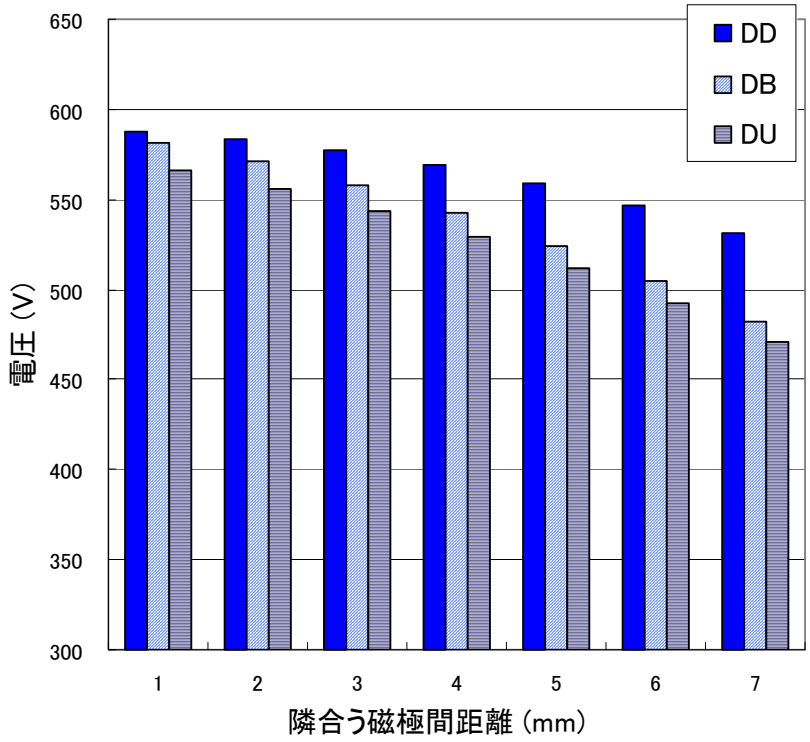

図 4-10　隣合う磁極間距離による最大電圧値（コアレスモデル）

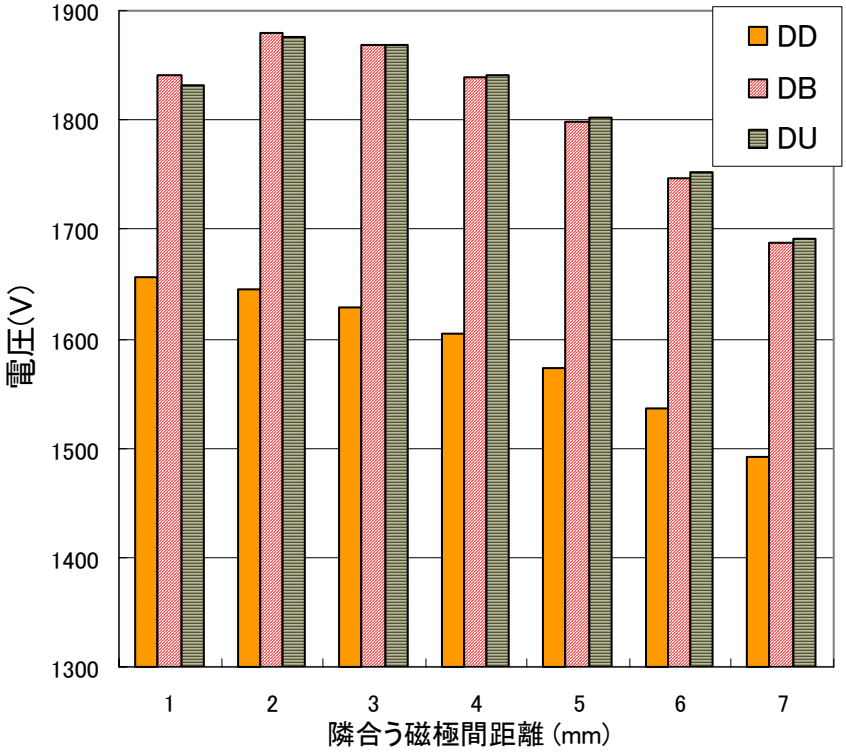

図 4-11　隣合う磁極間距離による最大電圧値（コア有りモデル）

2) トルク値

コアレスモデルでのトルク値は解析誤差により結果として微小な値が出力されるが 0 として見なして考えるので、各モデルにはコギングトルクの発生はないといえる。

コア有りモデルにおいても各モデルと比べてもほとんど変化はないものであった。

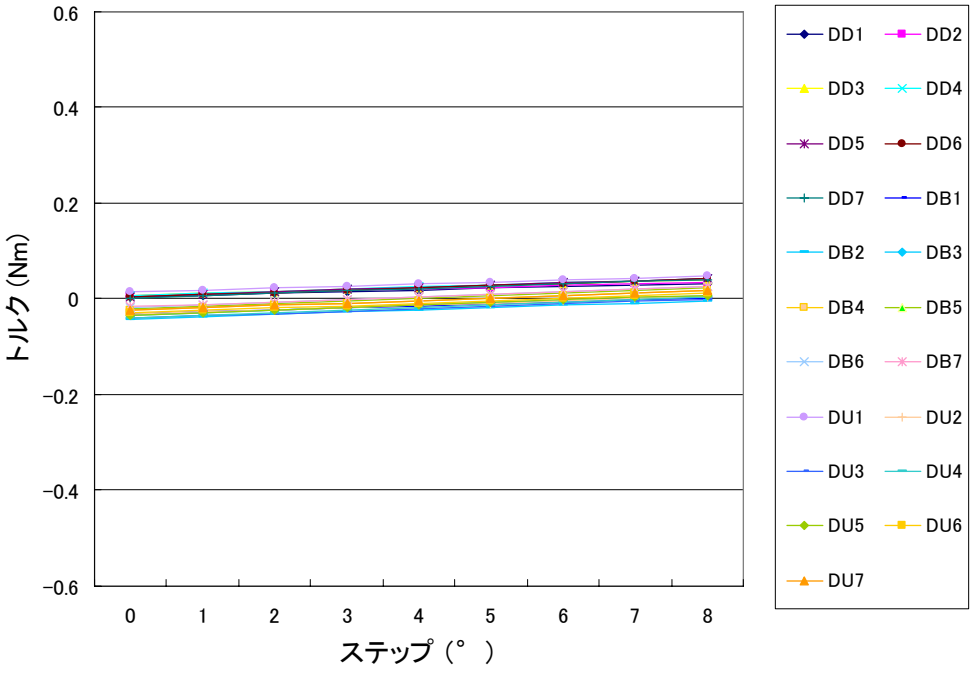

図 4-12 各モデルのトルク

（コアレス）

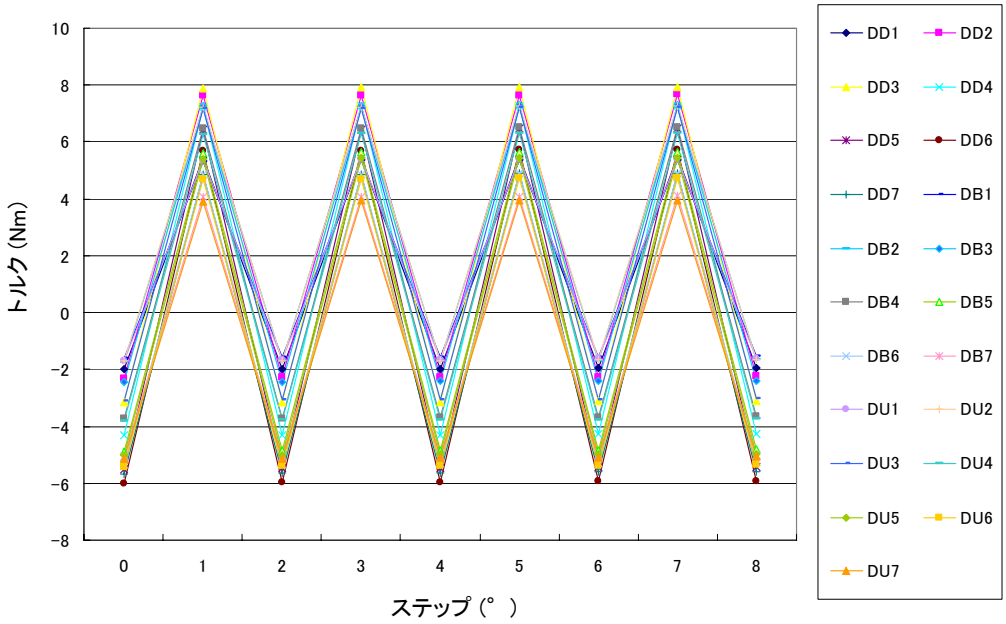

図 4-13 各モデルのトルク

（コア有り）

第 5 章：コアの厚みが及ぼす発電性能への影響

5.1　コアの形状

前述したようにコアレス発電機の発電量不足を解決するために、コイル内にコアを配置することを検討した。そして、発電量を上げつつコギングトルクを抑えるためのコア形状が考察された。その結果、コイル中心に薄板状のコアを挿入することが適当であった（図 5-1）。しかし、その板状コアの厚みに対する解析は不十分で、まだ検討の段階にあると感じた。

そして、板状コアの厚さが発電性能に及ぼす影響について解析を行った。解析対象となる発電機内のコイルの厚みは 20mm なのでコア厚さを 1mm から 20mm までとして解析した。

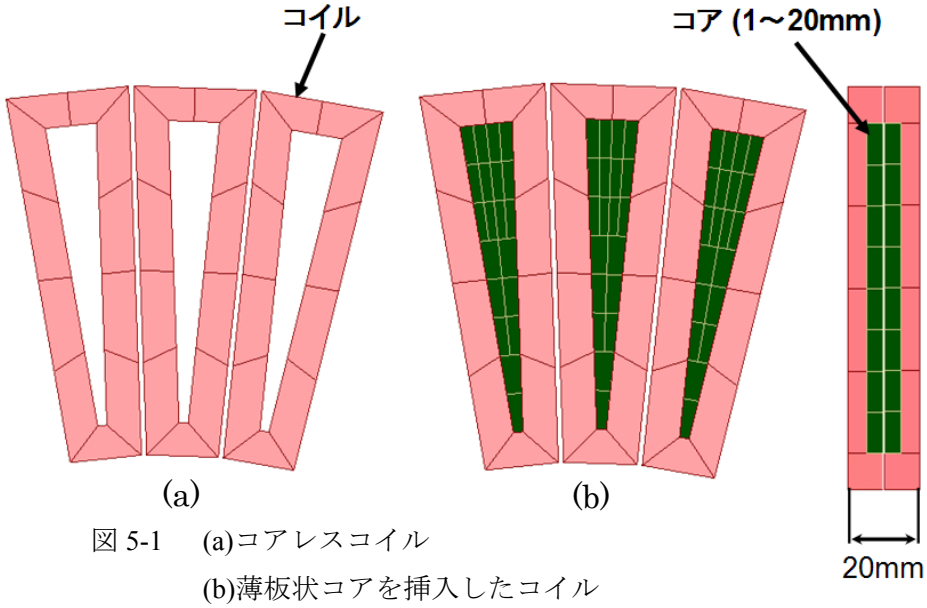

図 5-1　(a)コアレスコイル
(b)薄板状コアを挿入したコイル

5.2　解析モデル

・対象モデル

- ◆ φ600mm 発電機
- ◆ 磁極厚さ　12mm
- ◆ ヨーク厚さ　5mm
- ◆ 磁極間距離　23mm
- ◆ 巻数 136 巻
- ◆ コアの厚さ　0～20mm

・解析条件

- ● 回転数 200rpm
- ● 軸方向 1/2 モデル
- ● 半径方向 1/15 モデル
- ● 磁極とヨークを回転子

5-2　解析結果

1) 電圧値

図 5-2 に電圧値の解析結果を示す。それぞれのコアの厚さに対する最大電圧値をとっている。

コア厚さの増加とともに電圧値も一様に増加している。コアの厚みが増すと磁極とコアの距離が近づくため、磁石からの磁束をより多くコイル内に導くようになり、電圧値の上昇につながる。コアの厚みを 20mm としたとき、コアレス(0mm)と比較して電圧値は約 2.8 倍に増加する。

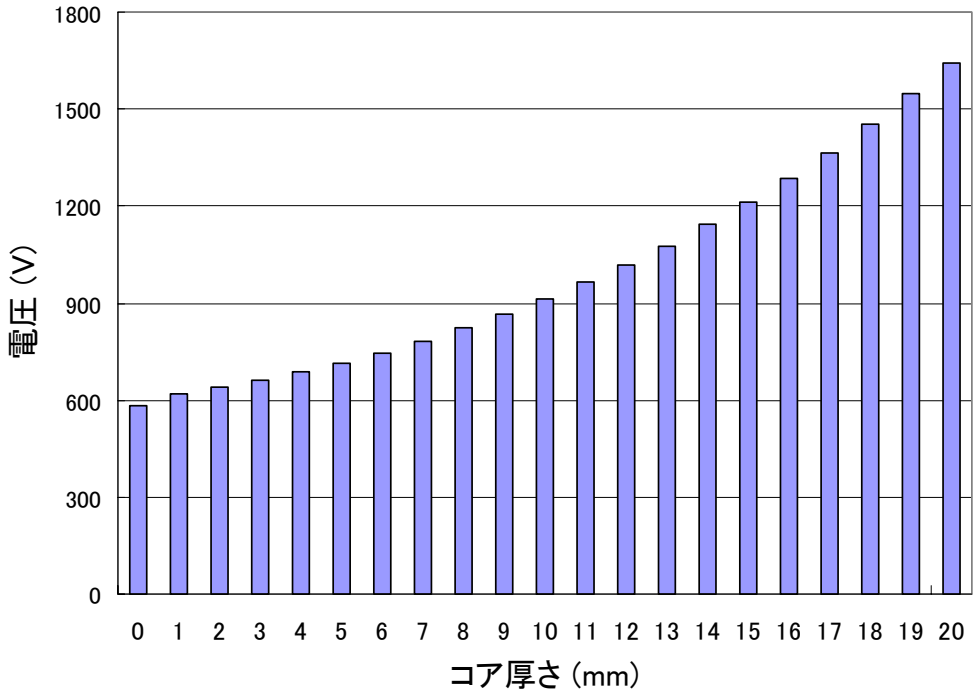

図 5-2　コア厚さに対する最大電圧値の比較

2) トルク値

図 5-3 に各コア厚みによるそれぞれの各回転角度におけるトルク値を示す。 図 5-4 はコア厚み変化によるトルクの最大値の変移を表す。

グラフを見ると、コア厚さ 10mm まではトルク値は極めて小さく、0 の値で横ばいとなるのでコギングトルクの発生が無いといえる。10mm を超えたあたりから値は緩やかに増加をはじめて、15mm を過ぎると値の増加量が多くなり、変移のカーブは大きく上昇する。コア厚み 15mm 時のトルク程度であれば、トルクが大きく得られる垂直軸風車ならば支障がないと思われる。

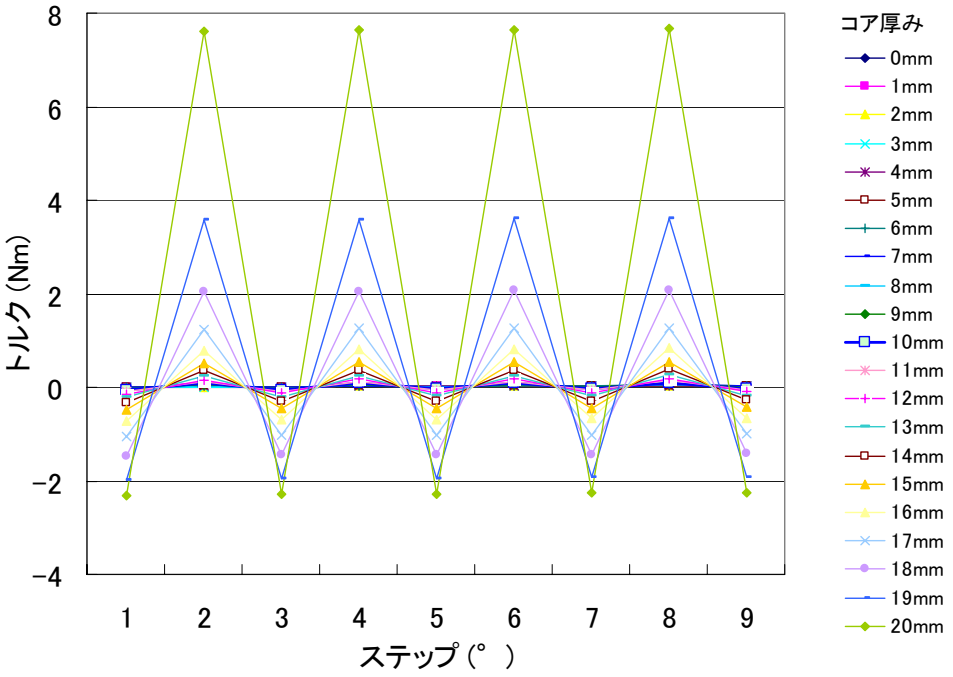

図 5-3　各回転角度におけるトルク

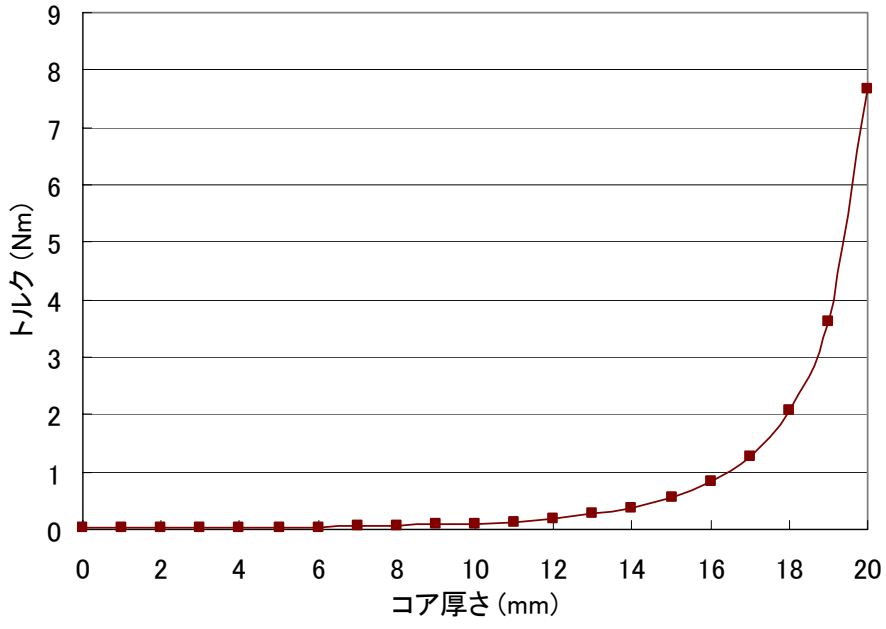

図 5-4　コア厚みによるトルク最大値の変移

第 6 章：結論

本研究では、低風速からの回転始動が可能なアキシャル型風力発電機の発電能力向上のために動磁場解析を用いて最適設計を求めた。そして以下の設計因子について検討を行った。

a) 対向する磁極の配置
b) 隣合う磁極間の距離と磁極周辺の変化
c) コアの厚さ

本研究の結論として以下のことが言える。

6-1　まとめ

a) 対向する磁極の配置

コイルにコアを挿入すると、コアが磁化しコギントルクの原因となる。そこで、従来のアキシャル型発電機構造である対向した磁極の配置角度をずらすことで、磁化したコアと磁極間に生じる引力と反発力をバランスよく分散できないかと考えた。これによりコア挿入による電圧の増加とコギングトルクの低減を図った。

解析の結果、磁極角度をずらしていくと向かい合う N 極と S 極は離れることになり、磁極間の磁場が弱まる。それによってコイルを通過する磁束も減少し、電圧値が下がった。コギングトルクに関しては、トルク値が従来のものと比べて減少することはなく、狙った通りの結果は見られなかった。

b) 隣合う磁極間の距離と磁極周辺の変化

隣の磁石への磁束の流れをできるだけ抑えるために、隣合う磁極間には距離を空け、さらにその間に鉄ヨークを挿入したモデルを解析した。

結果として、磁極間を広げることで磁極が小さくなるので電圧値は減少した。磁極間に鉄ヨークを挿入した場合、コアレスモデルでは磁極間の鉄ヨークに磁束が流れてしまい電圧値の増加はなかった。コア有りモデルでは磁極間の鉄ヨーク内を流れる磁束もコアを介してコイル内に導いくので電圧値を増加させた。しかし、各モデルでトルク値には変化が見られなかった。

c) コアの厚み

これまでの研究から、コアレスコイル内の少ない磁束密度を増加させるためには薄板状コアの挿入が最適であると導かれた。そして、薄板状コアの厚みを増すことによる発電能力への影響を求めた。

結果､コイル厚さ 20mm に対してコア厚さ 10mm までは回転に必要なトルクは極めて小さく、コギングトルクも発生しない。コア 15mm からトルク値は大きく上昇するので、それまでを回転の妨げにならない範囲とする。このとき電圧値はコアレスの状態と比べて約 2 倍となった。

6-2　結論

以上で述べたそれぞれの設計因子について複合的に検討する必要がある。つまり磁極因子について検討されたモデル（DD, DB, DU）に対して、コア厚みを変更させた解析を行った。3 つのモデルの磁極間距離はコアを挿入したとき最も電圧値の高かった 2mm とする。

以下のグラフはその解析結果である。 図 6-1 は DD, DB, DU の各コア厚さによる最大電圧値の変移を示す。図 6-2 は同様にトルクの最大値を示す。

電圧の結果では DB, DU モデルがコア厚みを増すごとに DD モデルと比べて増加量を大きくしている。トルクは 3 つのモデルともにほぼ同等の曲線を描いている。

ここでコア厚さが 15mm のときのトルク値は回転を妨げない非常に小さな値と見なし、そのときの電圧値に注目すると、最も電圧値が高いのは DB モデルである。このときの電圧値は 1310(V)であり、従来のコアレスモデルの電圧値と比べて約 2.25 倍の電圧増加となった。

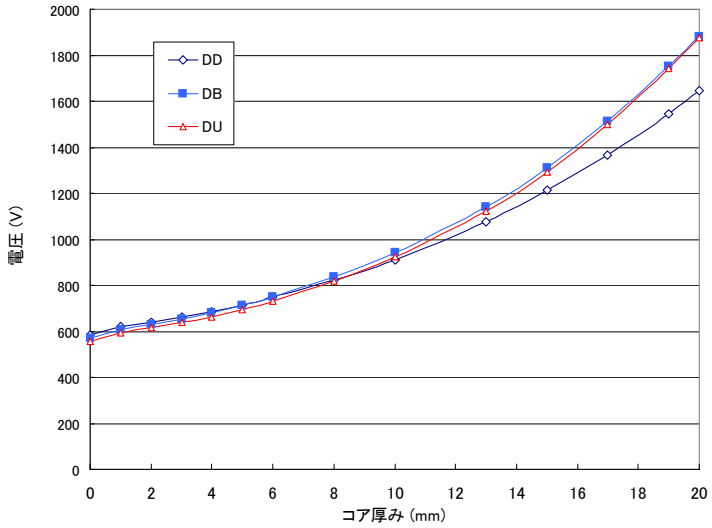

図 6-1　コア厚みによる最大電圧値の変移

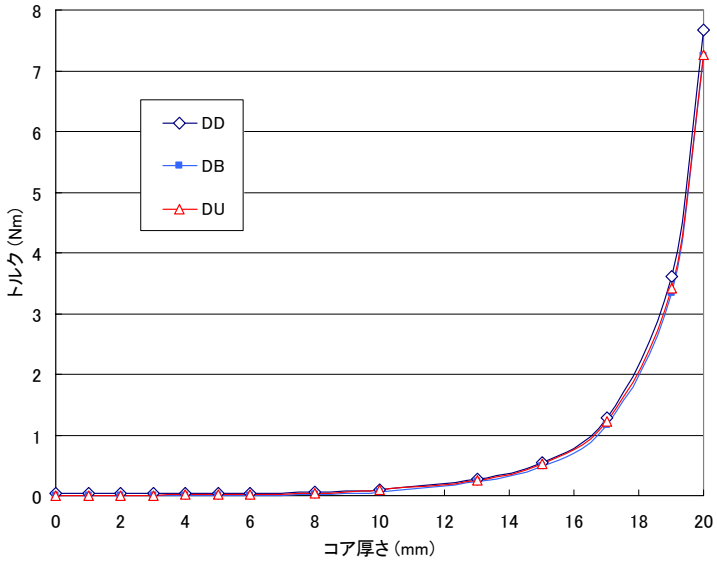

図 6-2　コア厚みによる最大トルク値の変移

参考文献

1) ELF/MAGIC 取扱説明書
2) NEDO：NEDO 資料（バーチャル図書館）(http://www.nedo.go.jp/library/index.html)
3) 総合資源エネルギー調査会（2005）「2030 年のエネルギー需要展望」
4) 山川和郎、大川光吉、宮元毅信（1979）『永久磁石磁気回路の設計と応用』
5) 内野喬誌（2003）「動磁場解析を用いた低回転用小型風力発電機の開発と最適設計」
6) 西村幸弘（2006）「小型風力発電機の設計と動磁場解析」
7) 高橋俊行、安田陽、大本親吾（2005）「小型風力発電用ラジアルタイプ回転界磁型同期発電機の提案と試作」

謝辞

本研究を行うにあたり、終始ご指導を頂きました高知工科大学 工学研究科基盤工学専攻 知能機械システム工学コースの坂本東男教授に深く感謝致します。

風力発電機での共同研究をさせていただきました株式会社スカイ電子様、動磁場解析について相談をさせていただきました株式会社エルフのサポートグループの皆様に厚く御礼申し上げます。また、同研究プロジェクトの西村幸弘氏、研究室の方々に深く感謝します。